

## Optimierung der Schaufelgeometrie eines Gleichstromzyklons mit 2C-PIV und CFD

### Uniflow cyclone vane design optimization with 2C-PIV and CFD

**Pillei M., Kraxner M., Kofler T. und Muschelknautz U.**

MCI, Department for Environmental, Process and Energy Engineering  
Maximilianstraße 2, 6020 Innsbruck, Austria

2C-PIV, Fluidodynamik, Gleichstromzyklone, Schaufelgeometrie  
2C-PIV, fluid dynamics, uniflow cyclones, vane geometry

### Zusammenfassung

Die Schaufelgeometrie des Drallerzeugers in einem Gleichstromzyklon hat einen entscheidenden Einfluss auf dessen Abscheideleistung. Im vorliegenden Beitrag wird eine Methode vorgestellt, mit der die Schaufelgeometrie des Drallerzeugers optimiert werden kann. In experimentellen Untersuchungen an Gleichstromzyklonen wurde gezeigt, dass durch Kürzung jeder zweiten Schaufel bei gleichbleibendem Druckverlust der Abscheidegrad erhöht werden kann [1]. Um die Ursache dieses Effektes zu untersuchen, wurden die Strömungsprofile in einem Schaufelkanal mit CFD-Simulationsrechnungen ermittelt und mittels PIV-Messungen validiert. Die PIV-Messungen zeigen, dass aufgrund der unterschiedlichen Schaufellängen des Kanals die Strömung auf der Rückseite der längeren Leitschaukel ablöst. Dieser Effekt wird durch die Strömungssimulation bestätigt. Durch die Einschnürung der Strömung im Kanal und die daraus resultierende höhere Umfangsgasgeschwindigkeit im Abscheider kann ein höherer Abscheidegrad erzielt werden. Versuche mit Staubbeladung, in denen der Abscheidegrad  $\eta$  gemessen wird, belegen diesen Befund: Bei einer Schaufelkürzung  $k_{ELA}/L_{ELA}$  bis zu einem Wert von ca. 0,25 steigt der Abscheidegrad an. Im selben Bereich wächst auch die über den Querschnitt gemittelte Geschwindigkeit im Kanal.

### Einführung

Gleichstromzyklone zeichnen sich gegenüber Gegenstromzyklonen durch ihre kompakte Bauweise und ihre einfache Integrierbarkeit in bestehende Rohrleitungen aus. Sie werden daher häufig in technischen Anwendungen eingesetzt, in denen der Raum für die Partikel-Gas-Trennung begrenzt ist. Im Gleichstromzyklon mit axialem Einlauf wird die Drallströmung durch feststehende, an einem zylindrischen Kern montierte Leitschaukeln im Zycloneinlauf erzeugt. Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluss einer alternierenden Kürzung der Leitschaukeln auf das Abscheideverhalten eines Gleichstromzyklons. Durch Kürzung jeder zweiten Schaufel konnte in Testversuchen ein positiver Effekt auf den Abscheidegrad sowie den Druckverlust eines Gleichstromzyklons festgestellt werden [1]. Die Ursache dieses Effektes soll mit Hilfe von CFD-Simulationen des Strömungsprofils in den Schaufelkanälen untersucht werden, welche mit PIV-Messungen validiert werden. Abb. 1 zeigt schematisch die gewählte Untersuchungsmethode.

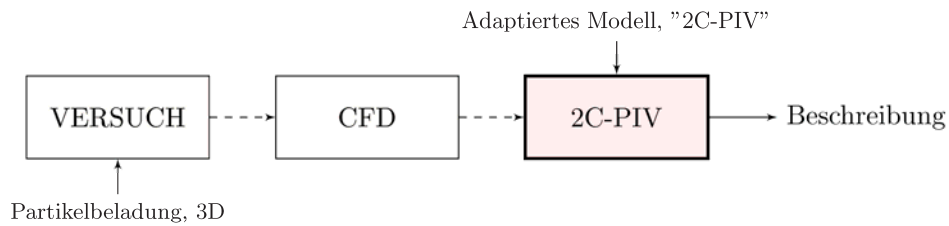


Abb. 1: Untersuchungsmethodik.

## Versuchsaufbau

Aufgrund der schwierigen optischen Zugänglichkeit des Leitapparates für die PIV-Messungen wird für die Messungen die Schaufelkanalströmung auf die Ebene abgewickelt, Abb. 2. Damit wird der gewünschte Messbereich für den Laserstrahl zugänglich gemacht und kann gleichmäßig ausgeleuchtet werden. Die optischen Messungen werden mit einem 2C-PIV-Messsystem von ILA GmbH durchgeführt. Abb. 2 zeigt die für die Messungen extrahierte Ebene. Es wird das Schaufelprofil bei halber Leitschaufelhöhe abgewickelt und entsprechend übertragen. Der Strömungskanal besteht aus einem Vorlaufkanal, dem auf die Ebene abgewickelten Schaufelkanal des Eintrittsleitapparates und einer Nachlaufstrecke. Dem Strömungskanal sind ein Laminator, eine Filtereinheit sowie eine kalibrierte Messblende und ein Gebläse nachgeschaltet.

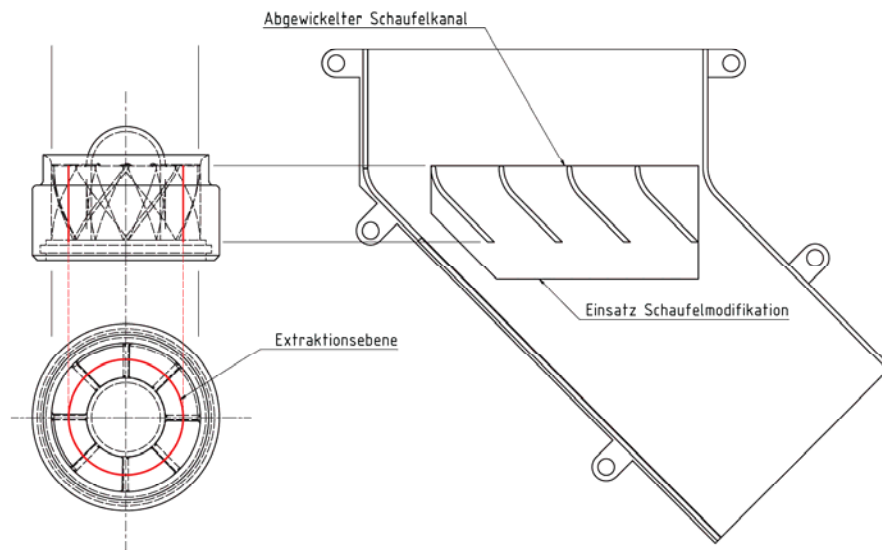


Abb. 2: Abwicklung des Schaufelkanals auf die Ebene.

Abb. 3 stellt die Abmessungen zweier benachbarter Schaufelkanäle mit einer mittleren gekürzten Schaufel schematisch dar. Die Abmessungen der Schaufelkanäle entsprechen den Abmessungen des originalen Eintrittsleitapparates (ELA), welcher in den Abscheideversuchen eingesetzt wurde: Dieser hatte 5 Schaufeln mit einem mittleren Schaufelanstellwinkel  $\alpha_{\text{ELA}} = 45^\circ$ , einer Schaufelkanallänge  $L_{\text{ELA}} = 32 \text{ mm}$  und einer Schaufeldicke  $s = 2 \text{ mm}$  [1].

$k_{ELA}$  beschreibt die Kürzung der Schaufel von der Anströmkante aus gemessen. Über den „Einsatz Schaufelmodifikation“ kann die Schaufelgeometrie variiert werden (Abb. 2). Um in den PIV-Messungen eine deutliche Änderung des Geschwindigkeitsfeldes zu erkennen, werden zwei Konfigurationen mit möglichst großem Geometrieunterschied vermessen,  $k_{ELA}/L_{ELA} = 0$  und  $k_{ELA}/L_{ELA} = 0.75$ .

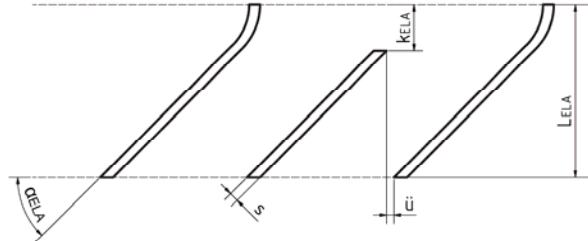


Abb. 3: Abmessungen der untersuchten Schaufelkanäle.

Die benötigten Bauteile werden mittels Rapid Prototyping gefertigt (Auflösung: 45  $\mu\text{m}$ ) und können so ident zum Original gefertigt werden. Der Kanal ist so konstruiert, dass für die PIV-Messung die benötigte Zugänglichkeit des Lasers durch Acrylglasfenster ermöglicht wird und der gewünschte Messbereich störungsfrei abgebildet werden kann. Aufgrund der perspektivischen Verzeichnung durch das Objektiv kann bei der gewünschten Auflösung nur ein Schaufelkanal vermessen werden [2]. Darüber hinaus muss die Aufnahme aus mehreren Aufnahmeserien kombiniert werden, um ein möglichst vollständiges Bild des Strömungsfeldes im Schaufelkanal zu erhalten.

## Methodik

### Abscheideversuche mit Partikelbeladung

Grundlegende Versuchsreihen, in denen Leitschaufeln mit und ohne Einlaufkrümmung (die Einlaufkrümmung ist anfangs parallel zur Hauptströmungsrichtung gerichtet) getestet wurden, zeigen Indizien für einen positiven Effekt der Einlaufkrümmung auf das Abscheideverhalten. Die Versuche wurden gemäß *ISO 5011:2000(E)* und *ISO 12103-A4* mit einer Staubbelastung von 1  $\text{g}/\text{m}^3$  und einer Reynoldszahl  $Re$  der Kanalströmung um 21000 durchgeführt. Die Massenbilanz erfolgte gravimetrisch (Auflösung: 0,01 g). Dazu werden Versuche zu folgenden ( $k_{ELA}/L_{ELA}$ ) - Verhältnissen durchgeführt (vgl. Tab. 1 [1]):

Verhältnis	1	2	3	4	5
$k_{ELA}/L_{ELA}$	0	0,11	0,17	0,22	0,27

Tab. 1: In den Abscheideversuchen eingestellte Schaufelkürzungen.

### Computational Fluid Dynamics

Die Strömungssimulation wird für den abgewinkelten Schaufelkanal durchgeführt. Als Solver wird *Ansys Fluent*® mit dem Turbulenzmodell „*Reynolds Stress Model* mit *Standard Wall Functions*“ gewählt [3]. Als Ausgangsbedingungen werden folgende Parameter verwendet:

$\rho_{\text{Luft}} = 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T_{\text{Luft}} = 293 \text{ K}$  (isotherm),  $\rho_{\text{Luft}} = 1,204 \text{ kg/m}^3$  (inkompressibel). Die Simulation erfolgt für die reine Gasphase. Die Reynoldszahl der Strömung wird analog zu den Versuchen mit Partikelbeladung mit  $Re = 21000$  eingestellt. Die Kürzung der Schaufeln  $k_{\text{ELA}}/L_{\text{ELA}}$  wird von 0 bis 0,75 in 26 Stufen variiert.

### Particle Image Velocimetry

Bei der 2C-PIV-Messung wird die Laserschnittebene so justiert, dass sie parallel zur Strömungsrichtung liegt. Mit Hilfe der kalibrierten Messblende wird ein Volumenstrom von 240  $\text{m}^3/\text{h}$  eingestellt, welcher, analog zum Staubversuch, einer Reynoldszahl  $Re$  der Kanalströmung um 21000 erzeugt. Die Durchflussmessung wird nach *DIN EN ISO 5167-1:2004-01* durchgeführt. Der mittels 3D-Drucker gefertigte Schaufelkanal wird matt-schwarz beschichtet, um die Reflexionen zu minimieren. Entsprechend der gewünschten Partikelverschiebung von 8-10 Pixeln (erwartete Maximalgeschwindigkeit im Querschnitt) werden die Parameter der PIV-Messung entsprechend Tab. 2 gewählt [4]:

	Konfiguration	Wert
Laser	Type	Nd:YAG
	Frequenz	$532 \text{ nm}^{-1}$
	Pulsabstand	$18 \mu\text{m}$
	Pumpzeit	$860 \mu\text{m}$
Optik	Apertur	f4.0
	Kameraanordnung	2C

Tab. 2: 2C-PIV Parameter.

Die Berechnung der Kreuzkorrelation erfolgt mittels VidPIV 4.7. Für die Kalibrierung wird ein *Linear Mapping* angewendet, um den Zusammenhang zwischen Pixeln (Kameradaten) und Weltkoordinaten zu definieren. Die *Kreuzkorrelation* wird mit einer *Interrogation Size* von 32px und einer *Separation Size* von 16px für die auszuwertende Region eingestellt. Des Weiteren kommen verschiedene Filter wie *Local Median Filter*, *Interpolate Outliners*, *Velocity Smoothing* sowie eine *Adaptive Kreuzkorrelation* zum Einsatz [4]. Eine Aufnahmeserie setzt sich aus 100 Doppelbildsequenzen zusammen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt mittels Tecplot 360.

### Ergebnisse

Frühere Untersuchungen an Gleichstromzyklonen zeigen, wie Abscheidegrad und Druckverlust mit steiler werdendem Anstellwinkel der Schaufeln zunehmen [5], [6]. Der vorliegende Beitrag beschreibt eine Möglichkeit, wie durch eine Reduzierung der Schaufellänge jeder zweiten Schaufel der Abscheidegrad bei gleichbleibendem Druckverlust erhöht werden kann. Abb. 4 zeigt die Auswirkungen der Schaufelkürzung  $k_{\text{ELA}}/L_{\text{ELA}}$  auf die aus der numerischen Berechnung des Strömungsverhältnisses errechnete Absolutgeschwindigkeit  $v/v_{\text{max}}$  am Kanalende und parallel dazu den in den Staubversuchen gemessenen Abscheidegrad  $\eta/\eta_{\text{max}}$ . Parallel zum Anstieg des Abscheidegrades zeigt sich auch in der Simulation ein Anstieg der Geschwindigkeit mit zunehmender Schaufelkürzung (vgl. Abb. 4).

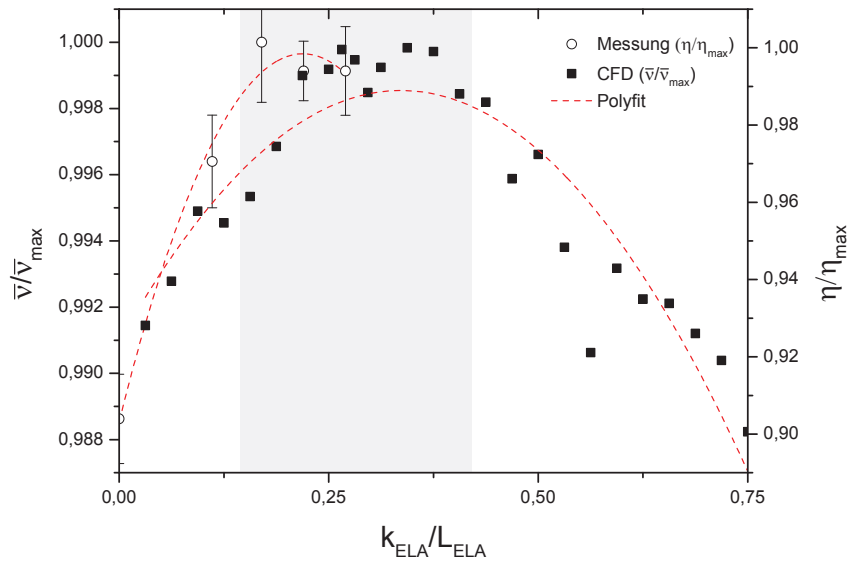


Abb. 4: Einfluss einer Schaufelkürzung auf Abscheidegrad und mittlere Kanalgeschwindigkeit.

Wie aus der Simulation ersichtlich wird, schnürt die Strömung im Schaufelkanal ein (vgl. Abb. 6). Sie erzeugt dadurch eine höhere mittlere Geschwindigkeit am Kanalende, woraus ein verbesserter Abscheidegrad resultiert. Das Maximum des Abscheidegrades liegt etwa bei einer Schaufelkürzung von  $k_{ELA}/L_{ELA} = 0,2$ .

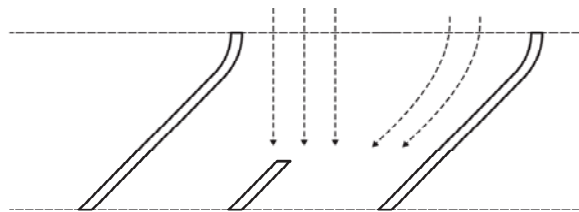


Abb. 5: Ablösung bei Schaufelkürzung (schematisch).

Die aus der Simulation ermittelte mittlere Geschwindigkeit am Kanalende wird bei einer Schaufelkürzung  $k_{ELA}/L_{ELA}$  im Bereich zwischen 0,25 und 0,35 maximal. Die Verschlechterung des Ergebnisses bei einer Kürzung  $k_{ELA}/L_{ELA} > 0,35$  kann auf die Querschnittserweiterung zurückgeführt werden. Abb. 5 zeigt schematisch die Strömungsrichtungen bei einer solchen Erweiterung. Durch die Kürzung wird zwar eine Zone hoher Turbulenz ausgebildet, allerdings darf diese Kürzung nicht zu stark erfolgen, da ansonsten die Strömung zum größten Teil mehr oder weniger ohne Umlenkung den Eintrittsleitapparat passiert. Dadurch sinkt auch der Abscheidegrad.

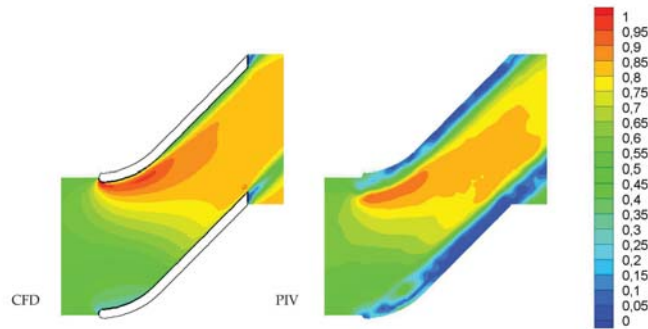


Abb. 6: Strömungsgeschwindigkeit  $v/v_{\max}$  bei ungekürzter Schaufel.

Die Graphiken (Abb. 6 und Abb. 7) zeigen die Ergebnisse aus der PIV Messung in direktem Vergleich mit den Daten aus der Simulation. Die Daten sind gleich skaliert und normiert dargestellt. Es kann zwar eine deutliche Übereinstimmung gezeigt werden, allerdings zeigt sich wie erwartet, dass aufgrund der höheren Auflösung der CFD-Berechnung im Vergleich zur PIV-Messung die punktuellen Geschwindigkeitsspitzen ausgeprägter dargestellt werden. Dies kann aus den verwendeten Glättungsalgorithmen, welche die lokalen Geschwindigkeitsfluktuationen nicht so detailliert auflösen, resultieren. Dieser Effekt zeigt sich auch im Bereich des Schaufelrückens, der wie zu erwarten eine größere Zone niedrigerer Geschwindigkeiten aufweist.

PIV-Messung und Simulation zeigen, dass die Ablösung der Strömung bei ungekürzten Schaufeln geringer ausfällt. Die Simulationsdaten zeigen auch, dass die Strömung am Schaufelrücken stärker anliegt und die Ausprägung der Unterdruckzonen bzw. der Zone erhöhter turbulenter kinetischer Energie geringer ist. Die PIV-Plots sind ohne Schaufeln dargestellt um diesen Effekt zu verdeutlichen. Aufgrund der fehlenden optischen Zugänglichkeit werden die PIV-Aufnahmen aus mehreren Doppelbildsequenzaufnahmen zusammengesetzt. Daraus resultiert auch die Zone sehr niedriger Geschwindigkeit hinter den Schaufeln in Abb. 6. Die Laserschnittebene kann diese Region bei bestehender Geometrieconfiguration nicht wie gewünscht ausleuchten und die Kamera kann somit keine Partikel registrieren.

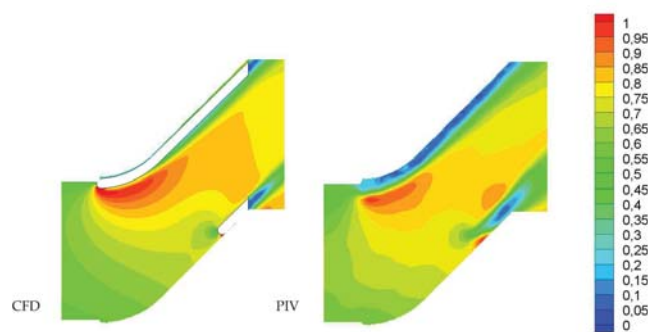


Abb. 7: Strömungsgeschwindigkeit  $v/v_{\max}$  bei um 75% gekürzter Schaufel.

Abb. 7 zeigt für den Fall der gekürzten Schaufel eine gute Übereinstimmung der CFD-Daten mit dem PIV-Ergebnis. Aufgrund der Schaufelkürzung kann die zu messende Region deut-

lich besser ausgeleuchtet werden. Daraus resultiert eine größere Übereinstimmung mit dem CFD-Ergebnis. Deutlich sichtbar ist die Region mit der größten Geschwindigkeit und auch der Staupunkt der Strömung vor der kurzen Schaufel. Ebenfalls sehr deutlich ist die Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Geschwindigkeitsgradienten im Zulauf zu den Schaufeln.

## Zusammenfassung und Ausblick

Abscheideversuche zeigen, dass eine alternierende Kürzung der Eintrittsleitapparatschaufeln einen positiven Effekt auf den Abscheidegrad eines Gleichstromzyklons hat. Mithilfe von Strömungssimulationen in Kombination mit PIV-Messungen wird deutlich, dass sich dieses Phänomen mit der Entstehung eines Ablösegebietes am Rücken der längeren Schaufeln erklären lässt. Für zukünftige Optimierungen bedarf es weiterer Untersuchungen der Schaufelgeometrie, insbesondere der Auswirkung unterschiedlicher Spreizungen zwischen innerem und äußerem Schaufelanstellwinkel auf das Abscheideverhalten. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass die ungekürzten Schaufeln verlängert werden sollten um die projizierte frei durchströmte Fläche konstant zu halten (vgl. [1]).

## Danksagung

Für die Unterstützung der umfangreichen Untersuchungen durch das MCI sei an dieser Stelle gedankt.

## Literatur

- [1] M. Kraxner, *Empirische Ermittlung von Auslegungskriterien für Gleichstromzyklone in Multizyklonblöcken*. Dissertation, TU München, 2013.
- [2] S. Beaulieu, C. Deschenes, M. Iliescu, and R. Fraser, "Flow field measurement through the runner of a propeller turbine using stereoscopic piv," in *Eighth International Symposium on Particle Image Velocimetry: (PIV '09)*.
- [3] Fluent, *Fluent 6.2*. Fluent Inc., Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH03766, USA, 2005.
- [4] M. Raffel, C. E. Willert, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry A Practical Guide*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2nd ed. 2007 ed., 2007.
- [5] M. Weng, *Experimentelle und numerische Untersuchung von Gleichstromzyklonen*. Dissertation, RWTH Aachen, 2002.
- [6] U. Muschelknautz, P. Pattis, M. Reinalter, M. Kraxner, *Design Criteria of Uniflow Cyclones for the Separation of Solid Particles from Gases*, CFB-10, 10<sup>th</sup> International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidized Bed Technology, Sunriver/Or, 2011.